터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제15권 제2호, 2005년 4월, pp. 119~128

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 15, No. 2, 2005, pp. 119-128
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

PFC2D를 이용한 절리암반의 역학적 물성 평가연구

박의섭[1)]*, 류창하[1)]

The Mechanical Behavior of Jointed Rock Masses by Using PFC2D

Eui-Seob Park and Chang-Ha Ryu

Abstract Although the evaluation of the mechanical properties and behavior of jointed rock masses is very important for the design of tunnel and underground openings, it has always been considered the most difficult problem. One of the difficulties in describing the rock mass behavior is the selection of the appropriate constitutive model. This limitation may be overcome with the progress in discrete element software such as PFC, which does not need the user to prescribe a constitutive model for rock mass. In this paper, a 30 m × 30 m × 30 m jointed rock mass of road tunnel site was analyzed. A discrete fracture network was developed from the joint geometry obtained from core logging and surface survey. Using the discontinuities geometry from the DFN model, PFC simulations were carried out, starting with the intact rock and systematically adding the joints and the stress-strain response was recorded for each case. With the stress-strain response curves, the mechanical properties of jointed rock masses were determined. As expected, the presence of joints had a pronounced effect on mechanical properties of the rock mass. More importantly, getting the mechanical response of the PFC model doesn't require a user specified constitutive model.

KeyWords Mechanical behavior, Jointed rock masses, PFC, Numerical simulation, Constitutive model

초 록 절리 암반의 역학적 물성 및 거동 평가가 터널 및 지하구조물의 설계에 매우 중요하다 할지라도, 그것은 항상 매우 어려운 문제로 간주되어 왔다. 암반 거동을 모사하는데 있어서 어려움중의 하나는 적절한 구성 모델을 선정하는 것이다. 이러한 한계점은 PFC와 같이 사용자로 하여금 암반의 구성 모델을 요구하지 않는 개별요소 프로그램의 개발과 함께 극복되어질 것이다. 본 연구에서는 도로터널 현장의 30 m × 30 m × 30 m 절리 암반블록을 대상으로, 시추 및 지표 지질조사를 통해 얻어진 절리의 기하학적 형태자료를 근거로 개별균열망이 작성되었다. 개별균열망 모델의 절리 형상을 근거로 절리가 없는 상태에서 점차적으로 절리군을 추가해가면서 2차원 PFC 모델이 만들어졌다. 또한 각각의 PFC 모델에 대한 수치모사를 통하여 각 모델의 응력-변형율 곡선이 얻어졌다. 응력-변형율 곡선으로부터 절리 암반의 역학적 물성이 결정되었다. 절리의 존재는 암반의 역학적 물성에 상당한 영향을 미쳤으며, 더욱 중요한 것은 PFC 모델의 역학적 거동은 기존의 수치모델에서 요구되는 구성 모델에 의하여 결정되지 않는다는 것이다.

핵심어 역학적 물성, 절리 암반, PFC, 수치 모사, 구성 모델

1. 서 론

현지 암반은 초기응력과 지각운동에 의해 생성된 다양한 구조적인 불연속면(절리, 층리, 단층, 틈 등)들을 포함하고 있으며, 이들 불연속면은 주변 암블록에 비해 낮은 강도 특성 및 높은 투수성을 가짐으로써 암반의 역학적, 수리적 거동을 좌우한다. 즉, 절리와 같은 불연속면이 발달된 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 특성에 의해 더 많은 영향을 받으며, 불연속체 암반에 관련된 공학적 문제들을 처리하는데 있어서 이러한 불연속면들을 이해하고 해석하는 일은 매우 중요하다.

일반적으로 조사 단계에서 얻을 수 있는 현지 암반의 물성값들은 대상지역내 노두나 시추공들에서 행해진 각종 조사, 현장시험 및 시추 코어를 이용한 실내시험들로부터 유추하는 것이 일반적이며, 대규모 현지암반을 대상으로 역학적 물성을 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다.

따라서, 지금까지 지하구조물의 안정성 해석 및 평가에 요구되는 현지 암반의 역학적 물성을 평가하는

[1)] 한국지질자원연구원 지반안전연구부
* 교신저자 : espark@kigam.re.kr
접수일: 2004년 12월 20일
심사 완료일: 2005년 4월 18일

주된 방법은 RMR[1], Q[2] 및 GSI[3] 등의 암반분류 시스템을 이용한 경험적 관계를 이용한 것으로 현장 및 실내에서 수행되는 여러 시험들로부터 구한 결과들은 단순한 보조차원으로만 활용되어왔다.

경험적 관계를 이용한 방법론은 다음과 같은 문제점들을 내포하고 있다[4,5].

a) 경험적 관계의 유효성: 경험적 관계들은 기본 역학(basic mechanics)으로부터 유도된 것이 아니기 때문에, 그것들이 최초로 개발된 상황과 유사한 환경에서만 유효성이 확신되어진다. 특히 새로운 건설 환경이 상대적으로 독특한 것이라면, 경험적 접근은 사전에 확인될 수가 없고, 이들의 적용은 적절한 관계식의 선택 및 경험자의 조언에 근거하여 판단할 수밖에 없다.

b) 응력 의존적인 변수: 현지 암반의 역학적 물성은 일반적으로 응력 의존적인 관계에 있으므로 어떠한 경험적 관계도 암반 응력 값을 직접 이용하지는 않는다. 다만, Q 시스템은 응력저감계수(SRF)를 통하여 응력 의존성을 고려하지만, RMR 시스템에는 암반 응력이 포함되어 있지 않다. 따라서 변형계수와 같은 입력 변수들을 응력 수준이 변화하는 수치해석에 사용할 때는 의문의 여지가 있다.

c) 입력 자료의 불확실성과 공간적 변화: 암반내 Q 또는 RMR 분포를 예측함에 있어서 여러 가지 불확실성이 존재하는데, 이것은 알려진 입력 자료를 가지고 물성을 평가하는 방법에 내포된 불확실성과 입력 자료의 3차원적 분포에서의 불확실성으로부터 생겨난 것이다. 이는 다른 영역내의 Q와 RMR 예측에서의 공간적 변화성은 주어진 자료의 통계학적 분포로부터 평가되어지고, 예측의 신뢰도는 사용된 자료의 양을 근거로 판단되기 때문이다.

이러한 단점에도 불구하고 암반분류시스템은 오랫동안 지하구조물(특히, 터널)의 설계분야에 폭넓고 성공적으로 사용되어 왔다. 즉, 경험적 암반분류법은 현지 암반의 역학적 물성을 평가하는 중요한 수단이었다.

현지 암반의 역학적 물성을 추정하기 위하여 경험적인 관계를 이용하는 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 대상지역내의 현장조건을 정확히 반영하지 못하는 단점이 있다. 즉, 암반의 역학적 거동에 가장 중요한 요소인 암종별 신선암의 거동특성, 불연속면의 역학적 특성 및 기하학적 특성(불연속면의 방향 및 빈도 등)에 대한 직접적인 반영이 어렵다는 것이다.

따라서 경험적 방법에 대한 대안으로 암반물성을 이론적-수치해석적 기법을 통하여 계산하는 방법이 이용될 수 있다. 즉, 암반의 역학적 물성을 신선암 및 불연속면의 역학적 거동과 불연속면의 기하학적 형상으로부터 계산하는 것이다.

이를 위하여 본 연구에서는 특정한 구성방정식 및 파괴기준을 적용하는 기존의 연속체 및 불연속체 해석 프로그램과 달리, 암석재료의 변형 및 파괴거동이 변화하는 미세구조의 함수로 표현되는 수치해석 프로그램인 Particle Flow Code 2D[6]를 사용하기로 한다.

2. Particle Flow Code

2.1 개요

지반이나 구조물 등의 어떠한 대상을 수치 모델링함에 있어, 유한요소법이나 FLAC과 같은 유한차분법과는 달리 대상을 개별적인 입자들의 집합체로 모델화하는 기법이 개별요소법이다. PFC는 이 개별요소법의 원리를 기본으로 하여, Cundall & Strack(1979)에 의해 언급된 바와 같이, 개발된 입자유동 해석 프로그램으로서 정적 및 동적거동 문제를 해석할 수 있다. 이 프로그램은 미국 Itasca Consulting Group, Inc.의 Cundall 등에 의해 원형입자의 운동 및 상호작용을 모델화하도록 개발되어 초기엔 과립상(granular) 재료의 거동 연구에 주로 활용되었다.

다른 개별요소프로그램인 UDEC이나 3DEC에서는 모델의 구성요소가 다각형인데 비하여 PFC에서는 원형입자로 구성되는 관계로, UDEC과 비교하여 다음과 같은 특징이 있다[6].

첫째, 원형입자간의 접촉여부 판단이 다각형 요소일 경우보다 간단한데 이는 곧 해석을 수행함에 있어 보다 효율적일 수 있다.

둘째, 기본적으로 모델링되는 변위의 크기에 제한이 없다.

셋째, UDEC이나 3DEC 등에서는 암반블록이 파괴 분리될 수 없는 모델링인 반면 PFC에서는 블록이 파괴되는 모델링이 가능하다. 따라서 터널이나 지하 채굴적 천반의 부분적 파괴 및 붕락양상 등을 시각적으로 모델링할 수 있다.

하지만, PFC를 이용한 블록 시스템의 모델링이 가지는 단점은 블록 경계면이 평면이 아니라는 점이다. 즉 원형 입자의 특성상 경계면에 울퉁불퉁한(bumpy) 면이 발생되는 것을 억제할 수가 없다.

기존의 연속체 및 불연속체 프로그램과는 달리 PFC에선 기하학적 형상, 물성 및 해의 조건에 관한 명시가 간단하지 않다. 즉, 연속체 프로그램에서는 격자가 생성되고 초기응력이 주어지고 고정 또는 자유 경계면이 설정되는 반면, PFC에선 주어진 체적에 입자를 채우는 방법이 다양하게 존재하므로 꽉 찬 상태를 미리 선언할

수 없고, 물리적인 채움과 유사한 과정은 요구되는 공극률이 얻어질 때까지 행해지는 것이 일반적이다.

특히 실험실에서 시험된 실제 재료의 결과를 가지고 결합된 입자로 구성된 모델의 거동을 맞추는 것이 요구될 때는 여러 번의 시행착오 과정을 통해야만 한다. 이는 PFC 토드에 사용되는 미시적인 물성과 형상으로부터 거시적인 거동을 예측하는 완벽한 이론이 존재하기 않기 때문이다. 그러나 Potyondy & Fairhurst(1999)는 암석 또는 콘크리트와 같은 cohesive-frictional 재료의 실험실 시험의 현재 한계점을 극복함에 있어서 입자 또는 미세 역학적 수치모델의 가능성을 언급하였다.

2.2 기본 이론

기본적으로 PFC 해석모델은 원형입자요소의 집합체로 구성되며, 각 요소입자는 강성체로서 입자간에는 점접촉형태를 가지며 접촉점에서는 어느 정도의 변위 중첩이 허용된다. 이 중첩량은 접촉력과 힘-변위 관계식에 의해 계산된다. 또한 접촉 입자간의 분리파괴는 규정된 결합력(인장강도 및 전단강도)과 작용하는 힘의 관계에 의해 결정된다.

PFC 프로그램에서는 다음과 같은 몇 가지 가정 또는 설정을 기본으로 하고 있다.

첫째, 모델을 구성하는 개개의 입자요소의 형태는 원형이다.

둘째, 각 입자는 강성체이다.

셋째, 각 입자간의 접촉형태는 극히 작은 면적 즉, 점으로 간주한다.

넷째, 강성입자들은 접촉점에서 서로 어느 정도의 중첩이 허용된다.

다섯째, 중첩량은 접촉력과 힘-변위 관계식에 의해 계산되며, 그 양은 입자 크기에 비해 매우 작다.

여섯째, 접촉된 입자간의 파괴에 관련되는 결합강도를 규정할 수 있다.

PFC 모델링의 기본적인 계산 절차는 주어진 시간단계별로 각 요소 입자의 운동방정식과 각 요소 입자간 접촉점에서의 힘-변위 관계식의 반복적인 적용에 의해 변형 및 파괴의 계산이 진행된다. PFC 해석의 기본적인 계산 절차를 도식화하면 Fig. 1과 같다.

원형입자의 결합체로 이루어지는 해석모델의 각 접촉 입자간의 결합 형태는 Fig. 2와 같이 접촉 결합 (contact bond) 및 병렬 결합 (parallel bond)의 두 가지 모델이 있다. 접촉 결합 모델에서는 인접요소간의 접촉점에서 일정한 수직강성 및 전단강성을 갖는 한 쌍의 스프링 거동으로 표현되는데 이 스프링은 규정된 인장강도 및 전단강도를 가진다. 반면에, 병렬 결합 모델에서는 입자요소가 구 또는 실린더 형태로 간주되며, 원 또는 사각단면에서의 접촉 거동을 나타낸다. 접촉 결합에서는 힘만이 전달되는데 반해 이 모델에서는 힘과 모멘트가 모두 전달되며, 원 또는 사각단면 형태의 접촉면상에 균등하게 분포하는 탄성스프링의 집합체로 거동을 나타낸다.

접촉 결합 모델에 있어서 접촉요소간의 수직 및 전단 변형과 파괴조건은 Fig. 3과 같다. 접촉점에서 발생하는 인장력이 규정된 수직방향의 결합강도 즉, 인장강도에 도달하면 결합은 깨어지고 수직 및 전단 접촉력은 0으로 된다. 전단 접촉력이 규정된 전단방향의 결합강도 즉, 전단강도에 도달하면 결합은 깨어지나 접촉력은 그대로 존재한다. Fig. 3에서 F^n은 수직 접촉력으로 $F^n > 0$

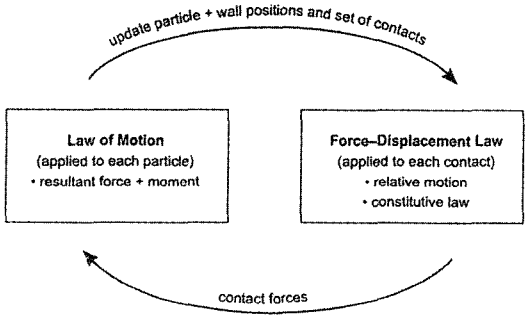


Fig. 1. Calculation cycle in PFC2D(Itasca, 1999)

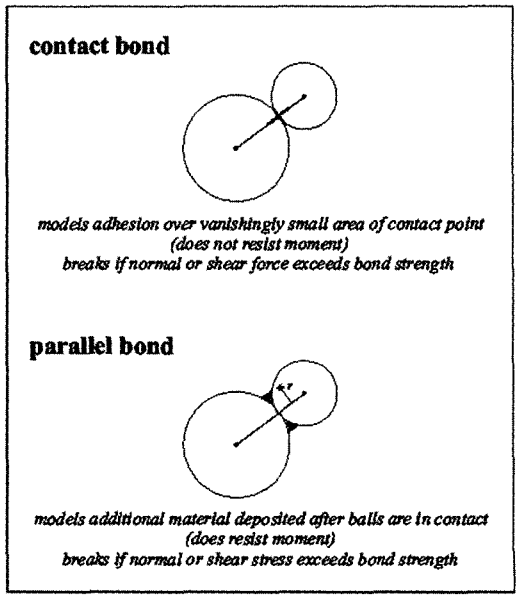
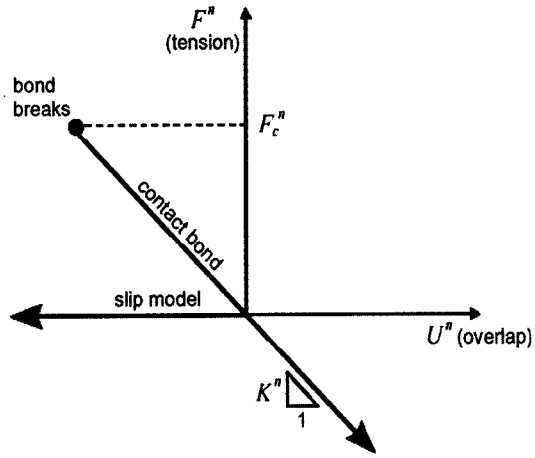
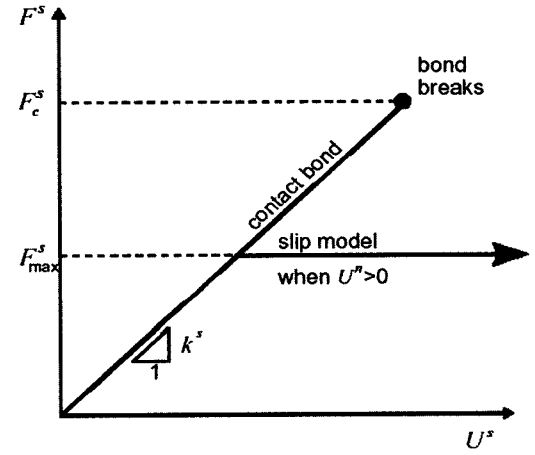


Fig. 2. Bonding logic of bond model(Itasca, 1999)



(a) normal component of contact force



(b) shear component of contact force

Fig. 3. Constitutive behavior for contact occurring at a point (Itasca, 1999)

이면 인장을 의미한다. U^n은 수직방향 상대변위로서 $U^n > 0$이면 두 요소가 중첩됨을 의미한다.

3. PFC 해석

PFC 프로그램과 같이 입자결합모델을 구성하여 실제 암석의 거동을 모사할 경우 입자의 물성치를 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 연속체 모델의 경우 모델의 입력 물성치는 실내시험으로부터 얻어진 결과로부터 직접 얻어낼 수가 있다. 그러나 입자결합모델의 경우에는 입자들의 상호작용에 의해 개개 입자들의 거동과 이 입자로 구성된 모델의 거동은 다른 양상을 보인다. 이로 인해 입자의 물성치를 결정하기 위해서는 여러 입자의 물성치를 반복적으로 입력하여 모델을 구성하고 이를 실제 암석의 거동과 비교하는 방법이 널리 사용된다.

본 연구에서 사용된, 불연속체 암반의 역학적 물성 및 파괴후 거동을 파악하기 위한 PFC 해석절차는 다음 Fig. 4와 같다. 각 해석 단계에 대한 상세한 설명은 각각의 절에서 언급하도록 하겠다.

3.1 실내시험 모사

본 해석에서는 실내시험과 같이 동일한 모델을 대상으로 여러 번의 수치모사를 실시하는데, 이 경우 동일한 입력 변수를 가지나 PFC내에 생성되는 원형 입자를 Random Generation 기법을 이용하여 5개의 PFC 무결암 모델을 생성하였다. 이는 암석내의 불균질성을 반영할 수 있다는 점에서 기존의 수치해석코드와는 다른 장점을 가진다. 즉, 동일한 입력물성을 적용하더라도, 모델내에 생성되는 입자배열에 따라 다른 역학적 물성 및 거동을 보이므로, 암반과 같은 불균질 재료를 모사하는

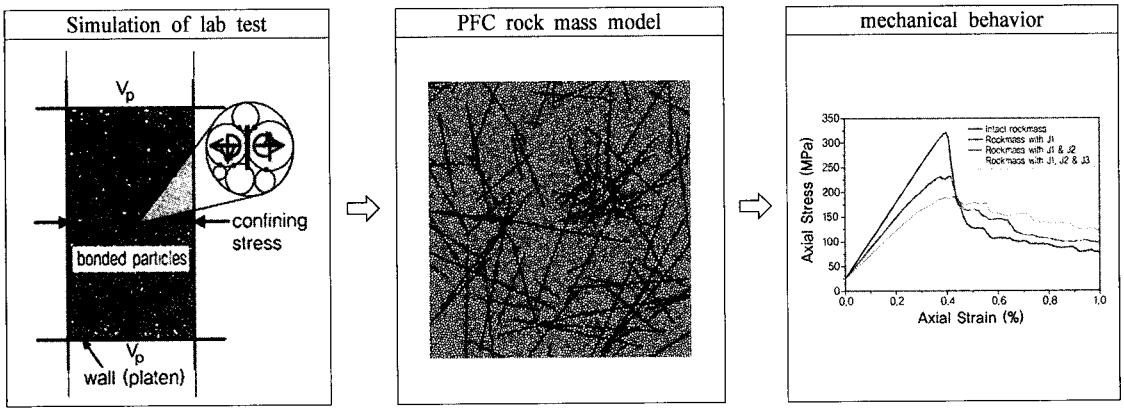


Fig. 4. Procedure of PFC modeling for jointed rock masses

데 적합하다.

무결암의 실내시험(간접 인장, 단축 및 이축압축시험)을 모사하는 PFC 해석과정을 살펴보면 다음과 같다(Fig. 5). 이 과정은 PFC 모델의 입력변수를 결정하기 위한 것으로써, 여러 번의 시행착오를 통하여 최종 결정된다.

① 시추코어를 대상으로 실험실 시험에서 구해진 무결암의 역학적 물성을 분석한다.

② 무결암 시료와 동일한 크기의 PFC 무결암 모델을 생성한다(Fig. 6).

③ PFC 무결암 모델에 사용되는 미세 물성(micro-properties)을 변화시키면서, 여러 번의 간접인장, 단축 및 이축 압축시험의 수치 모델링을 수행한다(Fig. 7).

④ 수치모델링으로부터 구해진 역학적 물성이 실제 무결암의 역학적 물성에 근접하는 PFC 무결암 모델의 미세 물성을 구한다.

본 해석에서는 병렬 결합(parallel bond) 모델이 사용되었으며, 이에 따른 무결암 모델에 요구되는 미세 물성은 다음 Table 1과 같다.

PFC 무결암 모델시료에 대하여 5회의 단축압축시험 수치모사를 통하여 PFC 모델의 영률, 최대강도 및 포아송비와 같은 역학적 물성을 Table 2와 같이 평균과 표

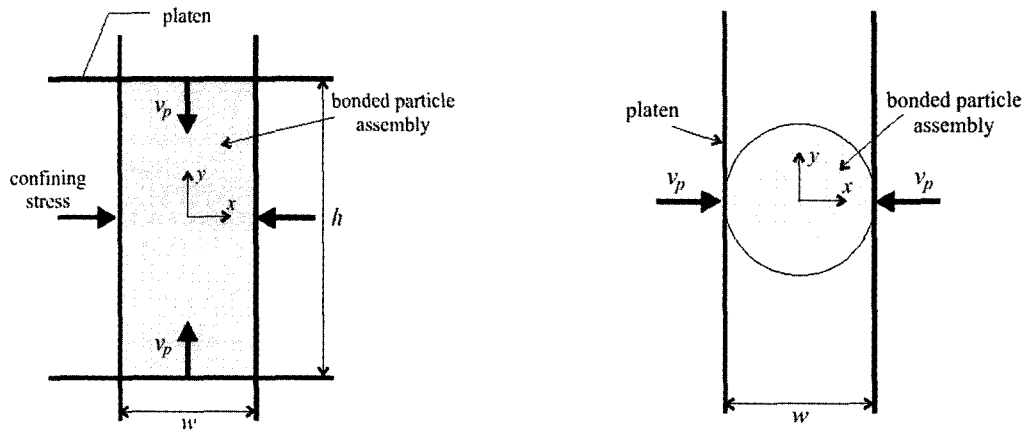


Fig. 5. Sketch of a biaxial and brazilian test environment in PFC modeling(Itasca, 1999)

Table 1. Microparameters for a parallel-bonded PFC intact rock model

microparameter	value	remarks
R_{min}(mm)	100.0	min. ball radius
R_{min} / R_{max}	1.66	min/max
Particle density, ρ(kg/㎥)	2,660	
Particle contact modulus, Ec(GPa)	38.0	ball property
Particle normal/shear stiffness, Kn / Ks	3.0	"
Particle friction coefficient, μ	0.50	"
Particle bond radius multiplier, $\bar{\lambda}$	1.0	"
Parallel bond normal/shear stiffness, Kn / Ks	3.0	bond property
Parallel bond modulus, Ec(GPa)	38.0	"
Parallel bond normal strength, $\bar{\sigma}_c$(MPa)	105±10.5	"
Parallel bond shear strength, $\bar{\tau}_c$(MPa)	105±10.5	"

Table 2. The mechanical properties between lab test and PFC modeling

Item	Lab test	PFC modeling	Remarks
Young's modulus(GPa)	41.3	41.1±1.2	5 times analysis
Compressive strength(MPa)	150.0	151.8±11.3	"
Poisson's ratio	0.24	0.237±0.02	"

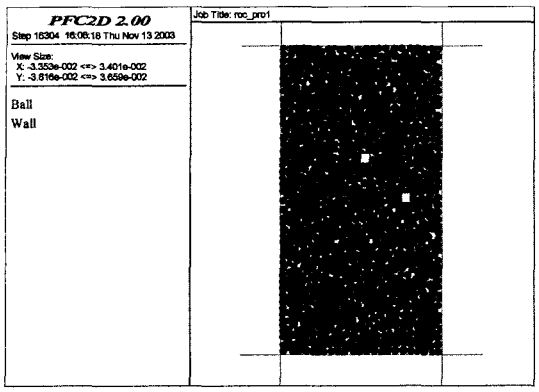


Fig. 6. PFC model for intact rock

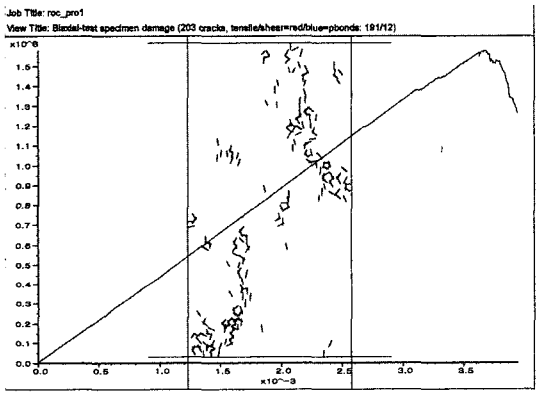
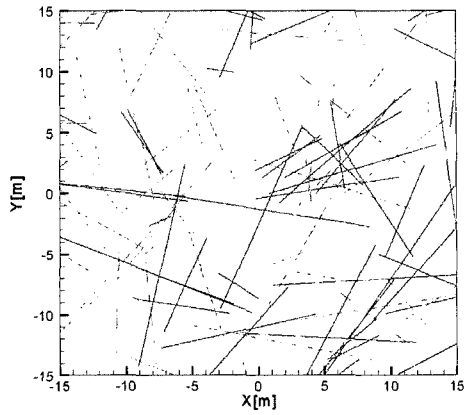


Fig. 7. Damage and stress-strain curve in PFC model at post-peak load(uniaxial compression test)



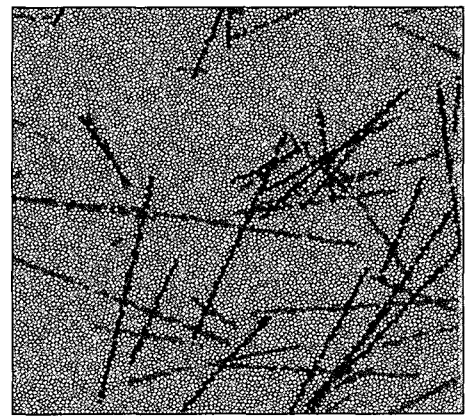


Fig. 8. The 2-D joint trace and PFC rockmass model (30 m×30 m)(Park, et al., 2004)

준편차로 구하였다. 표에서 보는 바와 같이 실내시험결과와 PFC 해석결과는 매우 유사한 역학적 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

3.2 PFC 암반모델

현지 암반은 신선암과는 달리 수많은 불연속면이 존재하고 있어 이로 인해 역학적 물성 및 거동이 바뀌게 된다. 따라서 대상지역내 암반의 역학적 거동에 가장 중요한 요소인 신선암의 역학적 특성, 불연속면의 역학적 특성 및 기하학적 특성(불연속면의 방향 및 빈도 등)을 PFC 코드내에 반영함으로써 암반물성을 이론적-수치해석적 기법을 통하여 계산하는 기법을 제안하고자 한다. 즉, 암반의 역학적 물성을 신선암 및 불연속면의 역학적 거동과 불연속면의 기하학적 형상으로부터 계산하는 것이다.

이를 위해 대규모 현지암반의 해석모델을 형성하는 과정을 살펴보기로 한다.

① 상세 지표지질조사 결과와 시추공내 시험에서 얻어진 다양한 절리정보를 종합적으로 분석하여 과업 구간내 해석영역의 3차원 절리망을 구성하고, 이를 근거로 2차원 절리 트레이스망을 구현한다.

② 이후 구성된 2차원 트레이스망을 근거로 30 m×30 m의 PFC 암반모델내에 2차원 절리들을 생성시킨다 (Fig. 8).

③ 또한 3차원적인 절리의 분포특성이 터널축 방향에 따라 2차원상에 어떻게 나타나며, 이로 부터 구해진 역학적 물성들이 어떤 영향을 받고 있는지를 살펴보기 위하여, 터널축 방향으로부터 0°~180°까지 20°간격으로 총 9가지 경우의 2차원 절리 트레이스망을 구하였다 (Fig. 9).

3.3 암반물성 평가

절리암반 모델의 역학적 물성 및 파괴후 거동을 평가

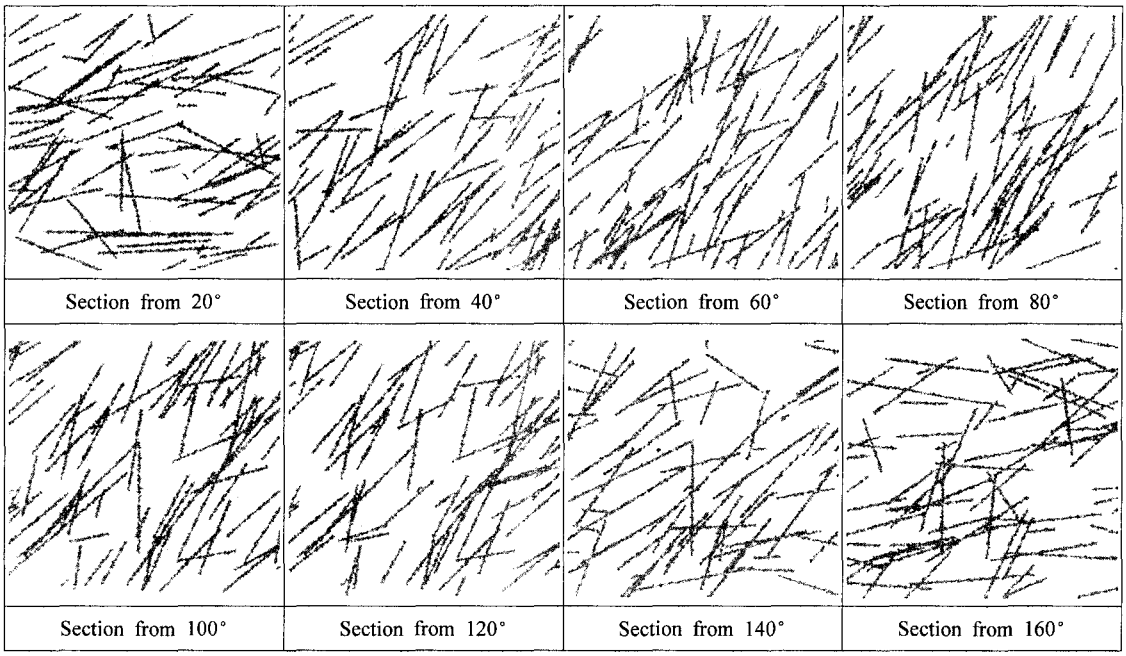


Fig. 9. PFC models for jointed rock masses with regard to tunnel intersection at each 20° rotation angle

하고자, 무결암에 해당되는 PFC 입자모델은 PFC 무결암 모델의 미세물성(micro-properties)을 그대로 적용하였으며, 절리에 해당되는 PFC 입자모델은 무결암에 비하여 상당한 약한 물성을 가지므로 이를 반영하여 무결암의 1/10에 해당하는 미세물성을 적용하였다(Table 3).

이와 같이 구성된 절리모델에 대해 무결암의 실내시험 모사와 동일한 방법으로 단축압축시험의 수치모사를 통하여 20° 각도별로 변형계수, 최대강도, 포아송비 등의 역학적 물성을 구하고(Table 4, Fig. 10), 봉압 조건을 달리하는 이축압축시험의 수치모사를 통하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 요구되는 점착력 및 내부마찰각을 구하였다(Table 5).

Fig. 11은 PFC 절리암반 모델의 이축압축시험에 의해 파괴된 터널 교차각별로 구해진 암반모델의 형상 및 계산된 응력-변형율 곡선을 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 파괴면은 교차각에 따라 변화된 절리면를 따라서 주로 발생하며, 파괴후 응력곡선은 신선암과는 달리 파괴후 강도가 급격히 감소하는 취성보다는 강도의 저하가 다소 적은 응력연화 거동을 보여주고 있다. 이를 통하여 암반내에 존재하는 절리의 특성은 암반의 역학적 물성뿐만 아니라 파괴거동에도 영향을 미침을 알 수 있다.

Table 3. Microparameters for a parallel-bonded PFC joint model

microparameter	value	remarks
Particle contact modulus, ***Ec***(GPa)	3.8	ball property
Particle normal/shear stiffness, ***Kn / Ks***	2.5	"
Parallel bond normal/shear stiffness, ***Kn / Ks***	3.0	bond property
Parallel bond modulus, ***Ec***(GPa)	3.8	"
Parallel bond normal strength, $\bar{\sigma}_c$(MPa)	10.5	"
Parallel bond shear strength, $\bar{\tau}_c$(MPa)	10.5	"

Table 4. The mechanical properties estimated by PFC modeling

Rotation Angle	Deformation modulus(GPa)	Maximum strength(MPa)	Poisson's ratio
0°	18.77	64.19	0.200
20°	18.48	50.67	0.316
40°	21.27	51.94	0.295
60°	22.09	46.79	0.287
80°	21.54	45.24	0.312
100°	21.34	46.79	0.296
120°	21.65	45.69	0.295
140°	21.02	52.07	0.290
160°	19.01	54.41	0.218
Average	20.57±1.48	50.86±5.96	0.279±0.04

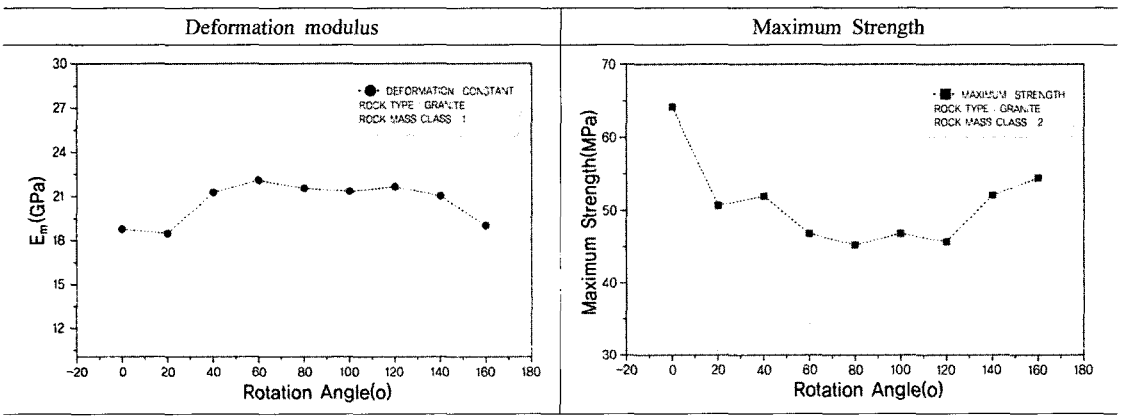
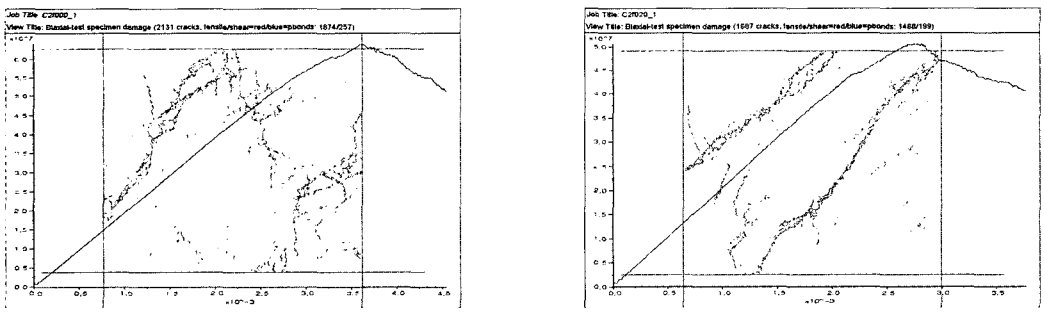


Fig. 10. Estimated deformation modulus and maximum strength of rock masses with different rotation angle

Table 5. The mechanical properties calculated under three different conditions of confining pressure

Confining pressure	Deformation modulus(GPa)	Maximum strength (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion(MPa)	Friction angle(°)
S3 = 0.0 MPa	21.02	52.07	0.290	11.20	41.04
S3 = 2.5 MPa	21.60	60.66	0.277		
S3 = 5.0 MPa	22.06	70.18	0.271		
S3 = 10.0 MPa	22.89	87.14	0.259		



(a) Rotation angle 0° (b) Rotation angle 20°

Fig. 11. Damage and stress-strain curve in PFC rock mass model at post-peak load

4. 결 론

1) 기존의 수치해석법에선 특정한 구성방정식 및 파괴기준을 사용함에 따라 암반의 역학적 거동이 미리 결정되는 반면, PFC에서는 이러한 조건들이 필요없는 미세 구조(ball)간의 역학적 관계에 의하여 결정된다. 특히, 이러한 특성은 기존의 수치해석법에 의해서는 정확한 파괴거동을 규명할 수 없다는 단점을 보완할 수 있다. 즉, 최대 강도이후의 파괴후 거동을 모사하는데 있어서 매우 유용할 것으로 판단된다.
2) 터널축 방향으로부터 0°~180°까지 20°간격으로 교차되는 총 9가지 경우의 2차원 절리 트레이스망을 근거로 절리암반 모델을 구성하였다. 절리암반 모델에 대한 이축압축모사로부터 암반 물성을 산정한 결과, 변형계수는 거의 비슷한 범위에 있었으나 최대강도의 경우는 교차 각도에 따라 상당히 다른 값을 보였다.
3) PFC 결과로 산정된 암반의 최대강도는 입력값으로 사용된 무결암 강도인 150 MPa에 비해 34% 정도로 강도값이 저하되는 것으로 나타났다. 일반적으로 RMR이 90° 이상인 암반의 압축강도가 무결암 강도의 40~50% 인 점을 고려해 볼 때 본 해석에서 얻어진 결과들은 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.
4) 대규모 암반영역을 대상으로 PFC 기법을 적용한 결과, 절리암반모델의 파괴면은 주로 절리를 따라서 발생하며, 파괴후 응력곡선은 무결암과 달리 소성거동을 보여주고 있다. 이를 통하여 암반내에 존재하는 절리는 암반의 역학적 물성뿐만 아니라 파괴거동에도 영향을 미침을 알 수 있다. 차후 좀 더 세부적인 분석이 이루어질 경우 절리암반의 역학적 물성 및 파괴 후 거동을 파악하는데 매우 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Bieniawski, Z.T., 1976, Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, Proceedings of the Symposium, eds. Z.T. Bieniawski, 97-106. Cape Town: Balkema.
2. Barton, N.R., R. Lien and J. Lunde, 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6.4, 189-239.
3. Hoek, E., P.K. Kaiser and W.F. Bawden, 1995, Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: Balkema.
4. Andersson, J., R. Christiansson and J.A. Hudson, 2002, Strategy for Development of a Descriptive Rock Mechanics Model: Site Investigation.SKB Technical Report TR-02-01, Stockholm, Sweden.
5. Staub, I., A. Fredriksson and N. Outters, 2002, Strategy for a Rock Mechanics Site Descriptive Model: Development and testing of the theoretical approach. SKB Report R-02-02, Stockholm, Sweden.
6. Itasca Consulting Group Inc., 1999, PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, Minneapolis: Itasca.
7. Cundall, P.A. and O.D.L. Strack, 1979, A discrete numerical model for granular assembles. Geotechnique. 29, 47-65.
8. Potyondy, D.O. and C.E. Fairhurst, 1999, The Value of Numerical Modeling in Understanding the Complete Load/Deformation Behavior of Cohesive-Frictional Materials. Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock Properties, ASTM STP 1350, W.A. Marr and C.E. Fairhurst, Eds., American Society for Testing and Materials: 290-299.
9. Park, E.S., C.D. Martin and R. Christiansson., 2004, Simulation of the Mechanical Behavior of Discontinuous Rock Masses Using a Bonded-Particle Model, in Gulf Rocks 2004: Rock Mechanics Across Borders & Disciplines. Proceedings of the 6th NARMS Conference, Houston, June 2004, D.P. Yale, S.M. Willson, and A. S. Abou-Sayed, Eds. Paper no. ARMA/NARMS 04-480.

박 의 섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

류 창 하

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1979년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1989년 University of Utah(in USA) 공학박사
Tel: 042-868-3236
E-mail: cryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 지하공간연구실장, 책임연구원